

文章编号: 1001-1455(2005)04-0330-05

高温 SHPB 实验技术及其应用*

谢若泽¹, 张方举¹, 颜怡霞¹, 田常津¹,

李玉龙², 陈裕泽¹, 李思忠¹, 陶俊林¹

(1. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 西北工业大学飞机系, 陕西 西安 710072)

摘要: 介绍了高温分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验方法, 建立了一套高温 SHPB 实验系统, 利用该系统研究了温度对某种抗氢钢动态压缩力学性能的影响, 实验温度最高达到 1 000 °C, 应变率为 500~1 000 s⁻¹。仅对试件进行加温, 并利用一套气动装置在加载前快速完成系统的组装, 以尽量减小试件中温度分布的不均匀性。研究表明: 该气动装置可以将加载前杆端与试件的完全接触时间控制在 500 ms 内; 该抗氢钢的温度软化效应很明显, 且温度敏感性随温度升高而下降。

关键词: 固体力学; 高温 SHPB 系统; 动态压缩; 抗氢钢; 力学性能

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

加强对温度相关的材料动态力学行为的研究, 已成为工程设计中的迫切需要; 同时在飞行器设计、穿甲、抗震、防爆等与国防工业相关的许多领域中, 这方面的研究也具有重要的应用价值。

SHPB 系统广泛应用于材料的动态力学性能研究, 但高温动态实验技术一直是研究中的难点之一。利用 SHPB 进行材料高温动态力学性能的测试, 有两种方法: 一是将试件以及小部分波导杆放入温度箱中同时进行加热。这样将不可避免地在输入、输出杆上形成温度梯度, 而温度梯度的存在将对测量精度产生一定影响^[1], 因此在进行数据处理时, 需采取各种方式对实验信号进行相应的修正^[2], 同时该方法需要测试波导杆中的温度分布, 并了解波导杆模量随温度变化的规律。二是利用特殊设计的实验装置, 降低进而忽略温度梯度的影响。该方法有多种实现方式如: 先只对试件加热, 实验前快速将试件安装在系统中, 其难点是系统的准静态对接与同步; 或在试件和波导杆之间加装弹性隔热保护块, 使波导杆处于室温状态, 其关键是保护块的选取; 或采用热不敏感材料制作波导杆等^[3~5]。

第一种方法使数据处理复杂化, 且实验温度范围以及应变率范围均比第二类方法小, 而第二种方法则不必考虑温度梯度的影响, 数据处理相对简单。本文中采用第二种方法, 即先仅对试件进行加热, 待达到预设温度后再完成实验系统的组装并进行实验, 从而消除波导杆上温度梯度的影响。所建立的高温 SHPB 系统实现快速组装的同步性和温度的稳定控制等。利用该系统, 本文中研究一定应变率范围内温度对某种抗氢钢动态压缩力学性能的影响

2 高温 SHPB 实验系统

本系统属于第二种方法, 即加热只对试件进行, 加热时波导杆位于加热范围之外。而当试件温度达到实验所要求的温度时, 再完成实验系统的组装并进行实验。在应力波到达试件的时候, 整套系统应处于正常工作状态, 即系统已组装完毕, 试件和波导杆对接完成, 处于如图 1 所示状态。本套高温 SHPB 系统在常规 SHPB 系统的基础上增加了加温系统、温控系统以及同步组装系统等, 下面分别予以介绍。

* 收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2005-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232024); 中国工程物理研究院基金项目(2000Z0307, 4210501-4-03)

作者简介: 谢若泽(1970—), 男, 硕士, 工程师。

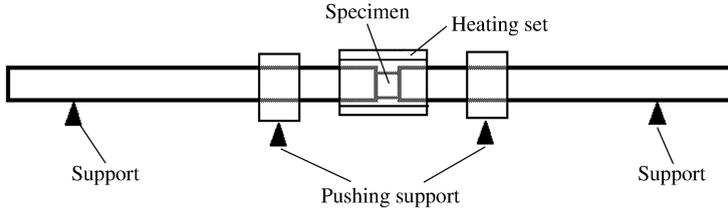


图1 高温 SHPB 系统示意图

Fig. 1 Schematic of the high-temperature SHPB system

2.1 加热系统及炉温分布

对试件采用电加热,即设计了一个内置电炉。加热炉由保温材料和加热线圈组成,并适当设计导杆出入口大小及导杆位置,尽量减少电炉内外的热交换,使热量集中于电炉内部,完成对试件的加热。

利用热电偶对加热炉的温度分布进行测定:将电炉中心区加热到 800 °C 并保温一段时间,将热电偶探头在炉腔内移动,测量各点的温度,从而确定加热炉的温度分布,结果如图 2 所示。测试进行了三次并进行了平均,由图可见,在距炉中心 20 mm 内炉温较均匀,实验时可将试件置于此范围内。

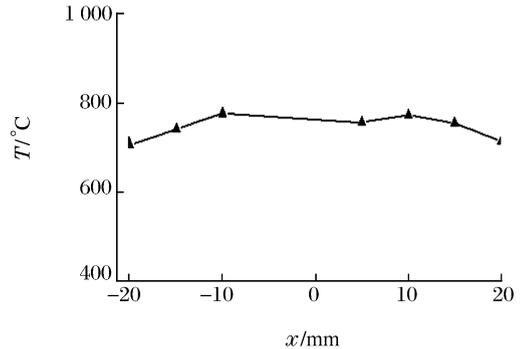


图2 加热炉温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in the heating set

2.2 温控系统

在高温动态实验中,温度的测量和控制也是很重要的一环。

采用间接测量法,即使用铠装热电偶,将其探头置于试件附近,同时在整个加温系统中增加了一个反馈系统,使用调节仪对加温进行控制,当温度达到预设值时停止加热,而当温度低于预设值时则重新加热。实验表明,当温度达到稳定状态时,该系统温度波动范围保持在 ± 10 °C。

当加热到预设温度并维持一段时间后,炉内温度达到稳定状态,即可进行实验。

2.3 同步组装及试件夹具

采用先只对试件进行加温、实验时再进行系统组装的方式进行高温动态实验。由于试件和波导杆间温差较大,组装完成时试件上的热量会迅速传递到波导杆上,使试件快速降温;同时如果波导杆长时间处于高温状态也将影响波导杆的力学性能,因此实验不仅要求应力波到达试件的时候整套系统已组装完成,同时要求系统组装完成到整个实验完成时间非常短。这使系统组装完成和实验进行的同步性成了实验的关键。

为解决上述问题,增加了气动组装系统。在入射杆和透射杆上各设置一个推动支座,如图 1 所示,支座内部有气室和推动活塞。实验中,在弹丸发射的同时,给支座气室充入一定压力(本系统充气压力为 0.4 MPa)的空气,支座将推动两杆向试件移动,系统组装完成时应力波到达,完成实验。为与同步推动相适应,对试件的支撑也采取了新的方式,使系统的组装不会改变试件的状态。

对于系统同步推动装置的性能,采用定性和定量两种方式进行了检验。

定性检验采用无试件空打实验,通过观察输入、输出杆上的应变波形来进行。图 3 为该实验典型波形。图中反射波的幅值很低且和透射波同时产生(两杆上应变片与接触端距离相同),波形与波导杆在实验前直接相接而不进行组装所获得的实验波形一致,说明应力波到达接触端时系统已组装完成。

图 4 为同步组装定量检验时示波器所记录的波形。过高的组装推动压力,会引起过度的装配振荡。所谓装配振荡是指由活塞压力推动前后导杆与试件碰撞接触后,相互分开,继续受活塞压力推回后再碰

撞,再分开,……,随着时间的推移,杆分开的时间越来越短,直到两杆完全接触,达到稳定的组装状态。图 4(a)中的曲线为利用电路的通断原理来检测杆的接触情况所获得的曲线:把入射杆和透射杆分别绝缘后作为电路的两极,当两杆未接触时,电路输出高电平;两杆接触时,电路输出低电平。A 点电位下降表示系统装配振荡开始,随后电位反复改变表示振荡过程,持续的低电平表示两杆完全接触。T 点电位跃升及其后长时间的高电平表明两杆完全脱离接触。适当调整支座推动压力与发射弹丸的时间,使应力波到达杆端时振荡已经结束,即可保证组装成功。

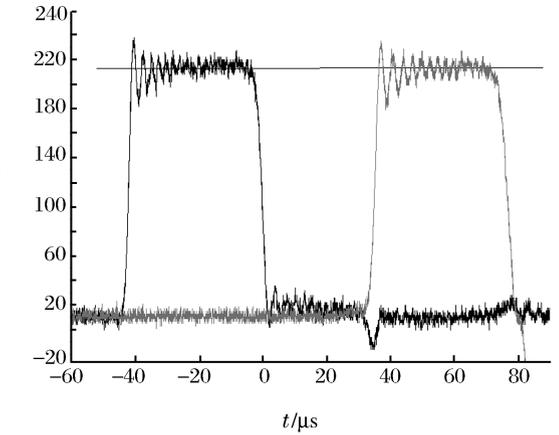
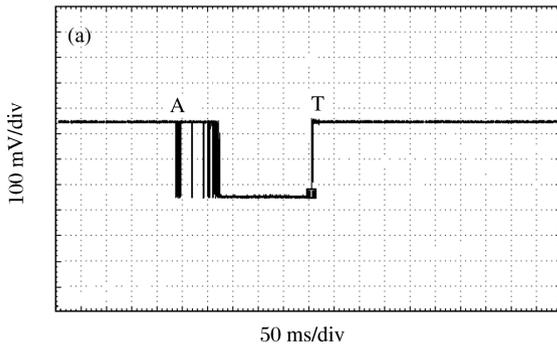


图 3 定性实验典型波形

Fig. 3 Typical wave forms in the qualitative experiments

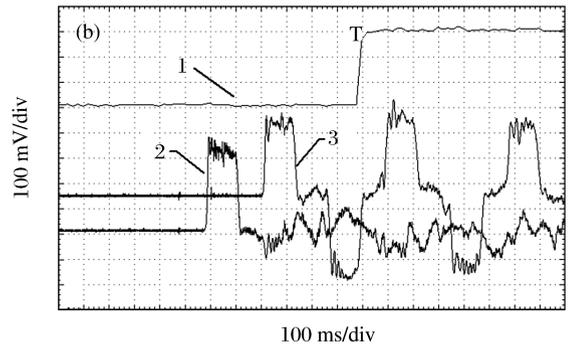


图 4 定量检验典型波形

Fig. 4 Typical wave forms in the quantitative experiments

图 4(b)为 T 时刻应力波和杆端接触状况对照图。图中曲线 1 为杆端接触通断信号,曲线 2 和曲线 3 分别为入射杆和透射杆上应变片所记录的应变波形。从图中可以清晰地看到应力波通过试件并传导透射杆后两杆才脱离接触,表明组装正常。

多次定量实验表明,去除装配振荡时间,实验前杆端完全接触时间在 500 ms 内,满足实验要求。

图 5 为改造后的高温 SHPB 系统全貌。

3 抗氢钢高温 SHPB 实验

3.1 实验设计

利用建立的高温 SHPB 系统,研究温度对某种抗氢钢动态压缩力学性能的影响。

实验选用的输入杆和输出杆均为长 1 100 mm、直径为 22 mm 的 18Ni 马氏体时效钢波导杆。加载设备为空气炮,加载弹丸选用与波导杆相同材料的长 300 mm、直径 22 mm 的钢弹。试件为直径 18 mm、长 9 mm 的圆柱形试件。实验温度分别选取室温(10 °C)、200、400、600、800、1 000 °C;空气炮气压统一选定为 1.2 MPa,弹速均约 33 m/s。

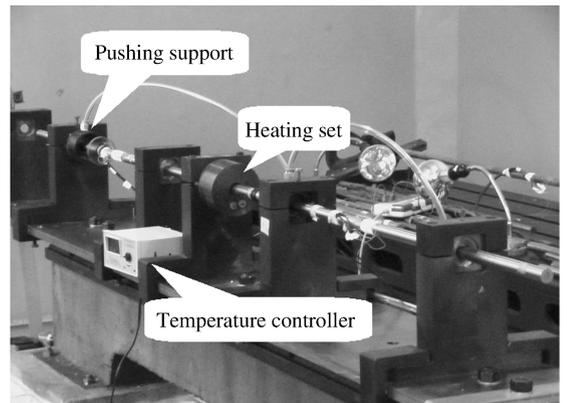


图 5 高温 SHPB 系统全貌

Fig. 5 The high-temperature SHPB system

3.2 接触热传导分析

当导杆与试件组装完成等待应力波到达时,导杆与试件产生热交换,在试件上形成温度不均匀,由此给实验带来误差。对此,针对实验状态进行了接触热传导分析计算。

计算条件为,用 $\varnothing 22\text{ mm}$ 的钢导杆, $\varnothing 18\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 的钢试件,导杆端部距炉芯中央 35 mm ,实验前两导杆的端部温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$,炉芯中央温度为 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ (上述为实验实测数据),接触时间分别取 $40、100、500\text{ ms}$,热阻抗系数为 $3\text{ mJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,用ABAQUS/standard程序计算,得到沿试件轴向温度分布如图6所示。可以看出试件中部温度均匀区分别为 $8、7、4\text{ mm}$,试件两端部温度分别为 $970、950、890\text{ }^\circ\text{C}$ 。在实验中温度的不均匀可控制在 10% 以内。

3.3 实验结果

该抗氢钢在几种温度下的典型动态压缩应力应变曲线如图7所示。从图中可以看到,总体上材料的流变应力 $\sigma_{2\%}$ (指试件发生 2% 应变所对应的应力)随实验温度提高而下降的趋势很明显。

表1所示为各种温度下该抗氢钢多次实验的平均流变应力 $\bar{\sigma}$ 和平均应变率 $\bar{\dot{\epsilon}}$ 。从表中可以看出,随温度升高,该抗氢钢的流变应力逐步降低。如温度为 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时的流变应力为 374 MPa ,比温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时的流变应力 762 MPa 降低了 51% ,即常温时的流变应力约为 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时的两倍,可见温度对该抗氢钢的软化效应很明显。

图8是该材料的平均流变应力温度关系图。从图中可以很直观地看出流变应力随温度的提高而下降的规律。图中显示,当实验温度低于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,该抗氢钢的平均流变应力随温度的上升而下降的速度较快,而高于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,该速度则趋于缓慢。

表1 抗氢钢在不同温度下的平均流变应力

Table 1 Average flow stress of antihydrogen steel at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	10	200	400	600	800	1 000
$\bar{\sigma}/\text{MPa}$	762	673	488	425	402	374
$\bar{\dot{\epsilon}}/\text{s}^{-1}$	569	860	1 191	1 400	1 102	1 609

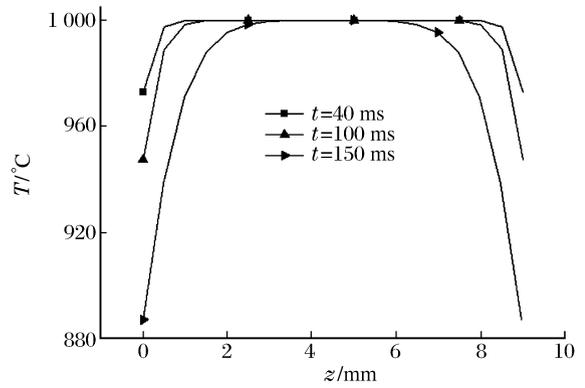


图6 不同接触时间时试件中轴向温度分布图
Fig. 6 Axial temperature distribution in the specimen for different contact times

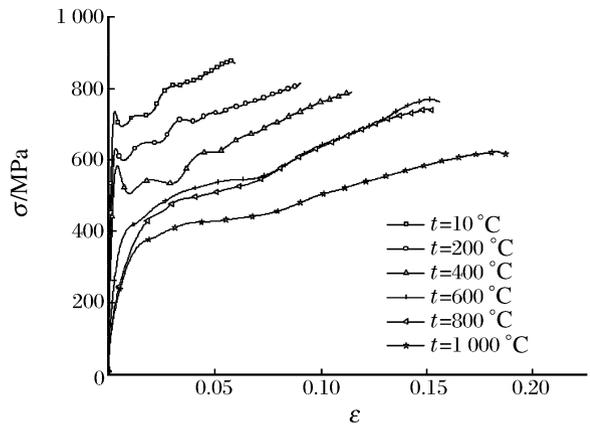


图7 抗氢钢动态压缩应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of antihydrogen steel under dynamic compression

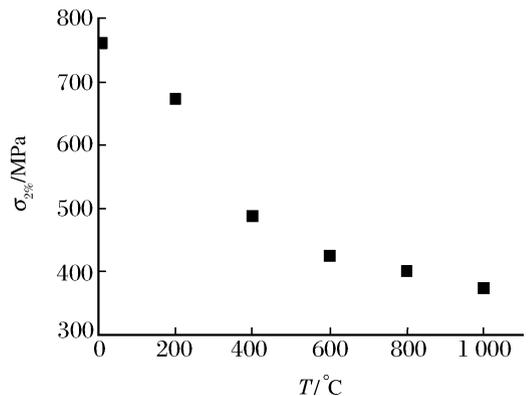


图8 抗氢钢平均流变应力温度关系图
Fig. 8 Average flow stress vs. temperature of antihydrogen steel

4 结论

在常规 SHPB 系统的基础上增加了气动同步系统,建立了一套高温 SHPB 实验系统,并利用该系

统研究了温度对某种抗氢钢动态压缩力学性能的影响,得出了以下结论:

(1)气动组装系统可以将实验前杆端完全接触时间控制在 500 ms 内,满足同步要求;

(2)高温 SHPB 系统运行良好,最高实验温度达到了 1 000 °C;

(3)该抗氢钢具有明显的温度软化效应,恒定撞击弹速下,当温度低于 400 °C 时,其流变应力随温度上升而下降的速度较快,而温度高于 400 °C 时,该速度则趋于缓慢。

参加实验的人员还包括中国工程物理研究院结构力学研究所的何鹏、徐艾民、吴庆海、翁桦、王薇等,特此致谢。

参考文献:

- [1] Gilat A, Wu X. Elevated temperature testing with the torsional split Hopkinson bar[J]. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(2):166—170.
- [2] 夏开文,程经毅,胡时胜. SHPB 装置应用于测量高温动态力学性能的研究[J]. *实验力学*, 1998, 13(3):307—313.
XIA Kai-wen, CHENG Jing-yi, HU Shi-sheng. Application of SHPB apparatus to the measurement of high temperature dynamical mechanical behavior of materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(3):307—313.
- [3] Lennon A M, Ramesh K T. A technique for measuring the dynamic behavior of materials at high temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 1998, 14(12):1279—1292.
- [4] Lee W S, Sue W C, Lin C F, et al. The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000(100):116—122.
- [5] Lee W S, Lin C F. High-temperature deformation behavior of Ti6Al4V alloy evaluated by high strain-rate compression tests[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998(75):127—136.

High-temperature SHPB experimental technique and its application

XIE Ruo-ze^{1*}, ZHANG Fang-ju¹, YAN Yi-xia¹, TIAN Chang-jin¹,
LI Yu-long², CHEN Yu-ze¹, LI Si-zhong¹, TAO Jun-lin¹

(1. *Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Department of Aircraft Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 100085, Shaanxi, China)*

Abstract: An experimental system of high-temperature split Hopkinson pressure bar (SHPB) was developed, and the dynamic properties of one type of antihydrogen steel at temperatures from room temperature to 1 000 °C and at strain rates from 500 to 1 000 s⁻¹ were studied using this system. The experimental system and the heated specimen were assembled rapidly by using a pneumatic mounting system to minimize the development of temperature gradients in the specimen. The experimental results show that the contact time is shorter than 500 ms. The softening effect of the antihydrogen steel due to heating is large, and the temperature sensitivity decreases quickly with the specimen temperature increasing.

Key words: solid mechanics; high-temperature SHPB system; dynamic compression; antihydrogen steel; mechanical property

* Corresponding author: XIE Ruo-ze
E-mail address: ruoze@163.com
Telephone: 0816-2485419